

Метод кодирования с преобразованием для сжатия космических гиперспектральных изображений

Р.Р. Юзькив^а, В.В. Сергеев^{а,б}

^а Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

^б Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, Молодогвардейская, 151, Самара, Россия

Аннотация

Предложен вариант метода кодирования с преобразованием для сжатия космических гиперспектральных изображений, основанный на формировании отдельной для каждого изображения матрицы квантования и предварительном удалении низкочастотных составляющих во входных данных. Продемонстрированы большие коэффициенты сжатия по сравнению с послойным алгоритмом JPEG при одинаковой среднеквадратической погрешности восстановления.

Ключевые слова: метод кодирования с преобразованием; космические гиперспектральные изображения; сжатие изображений.

1. Введение

Согласно [1], большинство алгоритмов сжатия изображений на борту современных летательных аппаратов можно условно разделить на две группы: методы дифференциального кодирования и методы кодирования с преобразованием. Среди методов кодирования с преобразованием широко распространены алгоритмы, основанные на дискретном косинусном преобразовании (ДКП) и вейвлет-преобразовании.

В данной работе предлагается вариант метода кодирования с преобразованием для сжатия космических гиперспектральных изображений (ГСИ) с некоторыми изменениями, в число которых входит формирование отдельной для каждого изображения маски квантования и соответствующего порядка обхода значений при статистическом кодировании, а также предварительное удаление низкочастотных составляющих во входных данных.

Работа имеет следующую структуру. Во втором разделе описывается метод кодирования с преобразованием на примере стандартного алгоритма JPEG для двумерных изображений и его применение для сжатия трёхмерных ГСИ. В третьем разделе описывается модификация JPEG для сжатия космических ГСИ с перечисленными выше изменениями. В четвёртом разделе приведены результаты экспериментальных исследований предложенных модификаций.

2. Реализация метода кодирования с преобразованием в алгоритме JPEG

Основной идеей, лежащей в основе метода кодирования с преобразованием, является переход от значений сигнала к коэффициентам (называемыми трансформантами) его разложения в ряд по какому-либо ортогональному базису (раздел 23.2 в [2] или пункт 6.5.1 в [3]). Эффективность использования трансформант вытекает из того, что их значения могут быть менее коррелированными, чем отсчёты сигнала. Следовательно, они могут содержать ту же информацию при меньшем объёме данных.

Одной из самых известных реализаций метода кодирования с преобразованием является стандарт JPEG сжатия изображений [4], где в качестве ортогонального преобразования используется двумерное ДКП. Опишем схему кодирования изображения алгоритмом JPEG.

Пусть дано двумерное изображение $f(n_1, n_2)$ размерности $N_1 \times N_2$, $n_1 = \overline{0, N_1 - 1}$, $n_2 = \overline{0, N_2 - 1}$. Алгоритм JPEG предусматривает разбиение данных на непересекающиеся блоки размерности 8×8 и их последующую независимую обработку (здесь и далее полагается, что размеры изображения делятся на соответствующие размеры блока без остатка).

Рассмотрим схему кодирования данных на примере одного блока $b(n_1, n_2)$ размерности 8×8 .

На первом этапе в блоке выполняется двумерное ДКП для получения трансформант $B(n_1, n_2)$. Далее полученные трансформанты квантуются:

$$BQ(n_1, n_2) = \left[\frac{B(n_1, n_2)}{Q(n_1, n_2)} \right], \quad n_1, n_2 = \overline{0, 7},$$

где $Q(n_1, n_2)$ – матрица квантования, $[\cdot]$ – оператор округления до ближайшего целого числа. В стандарте JPEG предлагаются значения $Q(n_1, n_2)$, подобранные экспериментальным путём на основе свойств восприятия зрительной системы человека.

На заключительном этапе полученные значения $BQ(n_1, n_2)$ разделяются на две группы коэффициентов, каждая из которых кодируется своим способом.

Значения $BQ(0,0)$ получили название DC-коэффициентов. При этом вместо самого значения DC-коэффициента используется его разность с соответствующим значением предыдущего по строке блока. Данные значения кодируются модифицированным кодом Хаффмана. Отметим, что из свойств ДКП следует, что эти коэффициенты задают среднее значение яркости в блоке.

Остальные коэффициенты $BQ(n_1, n_2)$ при $(n_1, n_2) \neq (0,0)$ называются AC-коэффициентами. В каждом блоке осуществляется обход AC-коэффициентов в зигзагообразном порядке от начала координат и их кодирование модифицированным кодом Хаффмана с применением кодирования длин серий.

Рассмотрим схему декодирования данных алгоритмом JPEG.

На первом этапе декодируются значения квантованных трансформант $BQ(n_1, n_2)$. Далее восстанавливаются сами трансформанты:

$$\bar{B}(n_1, n_2) = BQ(n_1, n_2) \cdot Q(n_1, n_2), \quad n_1 = \overline{0,7}, \quad n_2 = \overline{0,7}.$$

На заключительном этапе выполняется обратное ДКП для получения восстановленных значений изображения.

Одним из тривиальных способов обобщения двумерного алгоритма JPEG для сжатия трёхмерных ГСИ является его послойное применение. Трёхмерные данные разбиваются на набор независимых двумерных изображений, которые далее кодируются (декодируются) независимо друг от друга.

3. Модификация метода кодирования с преобразованием применительно к ГСИ

3.1. Трёхмерное ДКП с отдельной матрицей квантования

Одним из недостатков послойного метода является отсутствие учёта зависимости отсчётов по координате, вдоль которой идёт разбиение на слои. Естественным решением здесь будет являться переход от двумерных блоков к трёхмерным.

Пусть дано трёхмерное изображение $f(n_1, n_2, n_3)$ размерности $N_1 \times N_2 \times N_3$, $n_1 = \overline{0, N_1 - 1}$, $n_2 = \overline{0, N_2 - 1}$, $n_3 = \overline{0, N_3 - 1}$. Оно разбивается на непересекающиеся трёхмерные блоки $b(\mathbf{n})$ размерности $M_1 \times M_2 \times M_3$. Здесь и далее для упрощения выкладок использовано следующее сокращение:

$$\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3), \quad n_1 = \overline{0, M_1 - 1}, \quad n_2 = \overline{0, M_2 - 1}, \quad n_3 = \overline{0, M_3 - 1}.$$

Затем в каждом из блоков выполняется трёхмерное ДКП для получения трансформант $B(\mathbf{n})$, которые далее квантуются:

$$BQ(\mathbf{n}) = \left\lfloor \frac{B(\mathbf{n})}{Q(\mathbf{n})} \right\rfloor.$$

Матрицу квантования $Q(\mathbf{n})$ предлагается определять отдельно для каждого изображения. Это потребует дополнительного хранения $M_1 \cdot M_2 \cdot M_3$ значений $Q(\mathbf{n})$, однако это несравнимо малая величина по сравнению с основным объёмом данных.

В основе предлагаемого подхода для вычисления $Q(\mathbf{n})$ лежит идея оптимального распределения разрядов, описанная в разделе 6.2 [5] (также см. пункт 6.5.4 в [3]). Для использования указанной идеи нам понадобится представление дисперсии ошибки восстановления через ошибки квантования трансформант. Можно показать, что нужное соотношение задаётся следующей формулой:

$$\varepsilon_{KB}^2 = \frac{1}{M_1 M_2 M_3} \sum_{\mathbf{n}} E \{ e^2(\mathbf{n}, Q(\mathbf{n})) \} \|T_{\mathbf{n}}\|^2. \quad (1)$$

В формуле (1) $E \{ e^2(\mathbf{n}, Q(\mathbf{n})) \}$ – усреднённая по всему изображению ошибка квантования трансформанты с координатами \mathbf{n} , которая может быть найдена по следующей формуле:

$$E \{ e^2(\mathbf{n}, Q(\mathbf{n})) \} = \frac{M_1 M_2 M_3}{N_1 N_2 N_3} \sum_{\mathbf{b}} \left(\left\lfloor \frac{B(\mathbf{n})}{Q(\mathbf{n})} \right\rfloor Q(\mathbf{n}) - B(\mathbf{n}) \right)^2.$$

Под обозначением $\|T_n\|^2$ в формуле (1) понимается следующее:

$$\|T_n\|^2 = \sum_m T(n, m) T^*(n, m),$$

где $T(n, m)$ – ядро обратного ортогонального преобразования

$$b(n) = \sum_m B(m) T(m, n),$$

которое для ДКП будет выглядеть следующим образом:

$$T(m, n) = \prod_{i=1}^3 \lambda_{m_i} \cos\left(\frac{\pi(2n_i + 1)m_i}{2M_i}\right), \quad \lambda_m = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{N}}, & m = 0; \\ \sqrt{\frac{2}{N}}, & m \neq 0. \end{cases}$$

С учётом изложенного алгоритм вычисления матрицы квантования $Q(n)$, обеспечивающий дисперсию ошибки восстановления, не превышающую заданное значение σ^2 , может выглядеть следующим образом.

Сначала вычисляется некоторое первоначальное приближение матрицы квантования. В качестве значений матрицы предлагается брать максимальную степень двойки, которая входит в диапазон распределения соответствующей трансформанты:

$$Q(n) = \max\left(1, 2^{\lfloor \log_2(\max_B |B(n)|) \rfloor}\right),$$

где $\lfloor \cdot \rfloor$ – оператор взятия целой части.

Затем вычисляется ошибка восстановления ε_{KB}^2 по формуле (1). С учётом больших значений первоначального приближения матрицы квантования это недопустимо большая величина. Для её уменьшения до допустимых пределов далее в цикле выполняются следующие действия:

- для каждого элемента матрицы квантования $Q(n) > 1$ делается попытка уменьшения его значения в два раза и определяется, на какую величину $\xi(n)$ при этом уменьшается ошибка восстановления ε_{KB}^2 :

$$\xi(n) = \frac{\|T_n\|^2}{M_1 M_2 M_3} \left[E\{e^2(n, Q(n))\} - E\left\{e^2\left(n, \frac{Q(n)}{2}\right)\right\} \right];$$

- определяется элемент, для которого указанное уменьшение максимально, то есть равно $\max_n \{\xi(n)\}$, и именно этот элемент матрицы квантования уменьшается в два раза;
- величина ε_{KB}^2 уменьшается на $\max_n \{\xi(n)\}$ и осуществляется переход в начало цикла для выполнения следующей итерации.

Выполнение итераций заканчивается, когда ε_{KB}^2 станет меньше допустимой величины σ^2 .

3.2. Порядок обхода АС-коэффициентов

Зигзагообразный порядок обхода в стандартном двумерном алгоритме JPEG обусловлен следующими соображениями. АС-коэффициенты с большими координатами соответствуют высоким частотам. Для высоких частот используются большие значения матрицы квантования $Q(n_1, n_2)$ (это обусловлено свойством зрительной системы человека более воспринимать низкие частоты, чем высокие). Следовательно, при зигзагообразном порядке обхода квантованных АС-коэффициентов по мере удаления от начала координат всё чаще будут встречаться нулевые значения. Это приводит к более эффективному кодированию длин серий нулей.

Для ГСИ порядок обхода АС-коэффициентов в блоке предлагается определять по некоторой характеристике обхода $\varphi(n)$: если $\varphi(n) < \varphi(n')$, то коэффициент с координатой n должен предшествовать коэффициенту с координатой n' в порядке обхода.

В данной работе исследованы два варианта характеристики $\varphi(\mathbf{n})$.

В качестве первого варианта использовано расстояние «городских кварталов» между текущей координатой \mathbf{n} и началом координат:

$$\varphi_1(\mathbf{n}) = \|\mathbf{n}\| = |n_1| + |n_2| + |n_3|. \quad (2)$$

Данная характеристика может рассматриваться как обобщение зигзагообразного порядка обхода, применяемого в стандартном алгоритме JPEG. Иллюстрация данного факта для двумерного блока размерности 4×4 приведена на рис. 1. Одинаковым фоновым цветом выделены условные наборы значений (в каждый набор попадают значения с одинаковым расстоянием «городских кварталов»). При этом порядок обхода самих наборов одинаков для обоих алгоритмов, тогда как порядок обхода внутри наборов может различаться. Отметим, что характеристика $\varphi_1(n_1, n_2)$ для двумерного случая вырождается в зигзагообразный порядок при следующем правиле обхода значений внутри набора: если расстояние «городских кварталов» набора до начала координат нечётно, то значения обходятся в порядке возрастания координаты n_2 ; если расстояние чётно – то в порядке убывания координаты n_2 .

	0	4	5
1	3	6	11
2	7	10	12
8	9	13	14

а) зигзагообразный порядок обхода

	1	2	3
1	2	3	4
2	3	4	5
3	4	5	6

б) матрица расстояний «городских кварталов»

	0	2	5
1	3	6	9
4	7	10	12
8	11	13	14

в) вариант порядка обхода при использовании расстояния «городских кварталов»

Рис. 1. Иллюстрация порядка обхода при использовании расстояния «городских кварталов» для блока 4×4 .

Второй вариант характеристики обхода $\varphi(\mathbf{n})$ основывается на следующем соображении: оптимальный порядок обхода для каждого изображения будет свой. Поэтому в качестве значения $\varphi(\mathbf{n})$ для координаты \mathbf{n} предлагается брать количество квантованных АС-коэффициентов $BQ(\mathbf{n})$, равных нулю:

$$\varphi_2(\mathbf{n}) = |\{BQ(\mathbf{n}) \mid BQ(\mathbf{n}) = 0\}|. \quad (3)$$

Отметим, что при использовании характеристики $\varphi_2(\mathbf{n})$ возникает необходимость в дополнительном хранении $M_1 \cdot M_2 \cdot M_3$ значений, задающих порядок обхода. Однако, как и в случае с дополнительными данными для матрицы квантования $Q(\mathbf{n})$, это несравнимо малая величина по сравнению с основным объёмом данных.

3.3. Стационаризация космических ГСИ

В работе [6] было показано, что для космических ГСИ взвешенная сумма двух экспонент обеспечивает существенно более высокую точность аппроксимации наблюдаемой автокорреляционной функции по пространственным координатам, чем одна экспонента. Предложенный в указанной работе вид пространственной автокорреляционной функции соответствует известному представлению изображения в виде суммы двух составляющих – низкочастотной (описывающей протяжённые кусочно-постоянные области изображения) и высокочастотной (описывающей текстурную компоненту).

Данный факт позволяет попробовать осуществить дальнейшую модификацию метода кодирования с преобразованием. Её суть заключается в предварительном определении на первоначальном изображении блоков, по которым проходит граница между протяжёнными кусочно-постоянными областями, и устранении сильного перепада значений, возникающего на этой границе, путём вычитания математического ожидания соответствующих областей. В дальнейшем процесс разделения блока на две области будем называть «стационаризацией», так как он приводит к обнулению локальных математических ожиданий областей внутри блока.

Таким образом, суть модификации заключается в обобщении кодирования ДС-коэффициентов, которые вместо кодирования после этапа квантования трансформант теперь кодируются как математические ожидания на этапе, предшествующем этапу преобразования.

Указанная модификация должна привести к более эффективному статистическому кодированию АС-коэффициентов для стационаризуемых блоков. При этом возникает необходимость в хранении двух значений математических ожиданий (вместо одного значения ДС-коэффициента) для каждого блока преобразования $M_1 \times M_2 \times M_3$. Кроме этого, возникает необходимость в хранении информации о том, какие блоки подвергаются стационаризации, а также в хранении бинарных масок, задающих разделение на две области.

Для реализации данной модификации необходимо решить две задачи: задачу выбора блоков, в которых будет выполняться стационаризация и непосредственно задачу стационаризации (разделение блока на две области). Отметим, что если в блоке существует граница между двумя областями, то она будет проходить сквозь все спектральные слои. В

этом случае при решении указанных задач нет смысла разделять блоки по спектральной координате. То есть существенно важно рассматривать блоки размерности $M_1 \times M_2 \times N_3$, что сокращает объём дополнительной информации, связанный с идентификацией стационаризуемых блоков и соответствующих им бинарных масок.

3.3.1. Алгоритм стационаризации блока (разделения блока на две области)

Рассмотрим алгоритм стационаризации на примере одного блока $b(n_1, n_2, n_3)$ размерности $M_1 \times M_2 \times N_3$. Необходимо построить бинарную маску $\mu(n_1, n_2)$ размерности $M_1 \times M_2$, задающую разбиение пространственных отсчётов на две области (классы) с разными математическими ожиданиями.

Определим сечение блока при фиксированной спектральной координате:

$$L_K(n_1, n_2) = b(n_1, n_2, K).$$

Будем называть такие сечения слоями. Такие слои представляют собой обычные двумерные изображения размерности $M_1 \times M_2$.

Для построения бинарной маски предлагается использовать метод Оцу бинаризации двумерных изображений (в нашем случае слоёв), основанный на подборе порога, минимизирующего внутриклассовую дисперсию [7]. Кроме того, в упомянутом методе определяется мера разделимости $0 \leq \eta^* \leq 1$, равная нулю для полностью константного слоя и равная единице для слоёв, содержащих только два различных значения яркости.

Предлагается следующий алгоритм построения бинарной маски $\mu(n_1, n_2)$. Каждый слой блока подвергается бинаризации методом Оцу. При этом одной и той же пространственной области в различных слоях могут соответствовать разные логические значения «ложь»/«истина». Это связано с тем, что в одном слое математическое ожидание первой области может быть меньше математического ожидания второй области, а в другом слое – наоборот, больше. Для приведения всех слоёв к одной системе обозначений выбирается один эталонный слой, а все остальные слои приводятся к согласованному с эталонным виду. Далее путём суммирования всех бинарных масок строится окончательная уточнённая маска.

Формально описанный алгоритм выглядит следующим образом:

- определяется номер R эталонного слоя $L_R(n_1, n_2)$ по принципу максимизации меры разделимости η^* ;
- строится эталонная бинарная маска $\mu_R(n_1, n_2)$ путём бинаризации эталонного слоя $L_R(n_1, n_2)$ методом Оцу;
- для каждого слоя $K = \overline{0, N_1 - 1}$ вычисляется бинарная маска $\mu_K(n_1, n_2)$ методом Оцу;
- бинарные маски $\mu_K(n_1, n_2)$ приводятся к эталонному виду по следующей схеме: если количество совпадающих элементов в инвертированной маске $\overline{\mu_K(n_1, n_2)}$ и эталонной маске $\mu_R(n_1, n_2)$ больше количества совпадающих элементов в масках $\mu_K(n_1, n_2)$ и $\mu_R(n_1, n_2)$, то маска $\mu_K(n_1, n_2)$ инвертируется;
- формируется кумулятивная маска $\mu_\Sigma(n_1, n_2)$ путём покомпонентного суммирования всех масок $\mu_K(n_1, n_2)$ (при этом логическое значение «ложь» заменяется на -1 , логическое значение «истина» на $+1$);
- формируется бинарная маска $\mu(n_1, n_2)$ путём бинаризации кумулятивной маски по нулевому порогу:

$$\mu(n_1, n_2) = \begin{cases} 0, & \mu_\Sigma(n_1, n_2) \leq 0; \\ 1, & \text{иначе.} \end{cases}$$

После того как бинарная маска построена, происходит непосредственно вычитание математических ожиданий. Для каждого блока преобразования размерности $M_1 \times M_2 \times M_3$ вычисляются математические ожидания m_1 и m_2 каждой из областей, задаваемых соответствующей маской $\mu(n_1, n_2)$. Затем из каждой области вычитается соответствующее математическое ожидание. Напомним, что маска $\mu(n_1, n_2)$ определяется для всех спектральных слоёв, то есть для блоков с одинаковыми пространственными координатами будет использоваться одна и та же бинарная маска $\mu(n_1, n_2)$.

3.3.2. Алгоритм выбора стационаризуемых блоков

В данной работе предлагается подвергать стационаризации некоторую заданную долю ω всех блоков, отобранных по принципу максимальной разницы среднеквадратической ошибки при наличии разделения блока на две области и его отсутствия. Алгоритм выглядит следующим образом:

- вычисляются математические ожидания μ_b блоков $b(\mathbf{n})$ размерности $M_1 \times M_2 \times M_3$;
- вычисляется среднеквадратическое отклонение σ для каждого блока $b(n_1, n_2, n_3)$ размерности $M_1 \times M_2 \times N_3$ при отсутствии разделения на две области:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M_1 M_2 N_3} \sum_b \sum_n (b(\mathbf{n}) - \mu_b)^2};$$

- ко всем блокам применяется процесс стационаризации, в результате чего получаются стационарные блоки $b^s(n_1, n_2, n_3)$ размерности $M_1 \times M_2 \times M_3$;
- вычисляется среднеквадратическое отклонение σ^s для каждого блока $b^s(n_1, n_2, n_3)$ размерности $M_1 \times M_2 \times N_3$ при наличии разделения на две области:

$$\sigma^s = \sqrt{\frac{1}{M_1 M_2 N_3} \sum_{n_1=0}^{M_1-1} \sum_{n_2=0}^{M_2-1} \sum_{n_3=0}^{N_3-1} (b^s(n_1, n_2, n_3))^2};$$

- строится гистограмма распределения значений $\Delta\sigma = \sigma - \sigma^s$;
- по гистограмме вычисляется квантиль $K_{1-\omega}$;
- по условию $\Delta\sigma > K_{1-\omega}$ отбираются блоки $b(n_1, n_2, n_3)$ размерности $M_1 \times M_2 \times N_3$, которые в итоге будут подвергаться стационаризации.

4. Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились на наборе из четырёх ГСИ из базы данных [8], приведённых на рис. 2. Параметры всех изображений следующие: количество строк $N_1 = 512$, количество столбцов $N_2 = 512$, количество каналов $N_3 = 224$, отсчёты каждого изображения были приведены к беззнаковым 8-битным числам. Для трёхмерных алгоритмов размеры блока $M_1 = M_2 = M_3 = 8$.

Зависимость коэффициента сжатия от среднеквадратической ошибки восстановления при использовании описанных модификаций приведена на рис. 3. Алгоритмы имеют следующие обозначения:

- JPEG-Z – послойный двумерный метод, основанный на стандартном алгоритме JPEG, при котором разделение по слоям идёт по спектральной оси;
- JPEG-Y – послойный двумерный метод, основанный на стандартном алгоритме JPEG, при котором разделение по слоям идёт по вертикальной пространственной оси;
- МК («матрица квантования») – трёхмерный метод с матрицей квантования, вычисляемой отдельно для каждого изображения, зигзагообразной характеристикой обхода АС-коэффициентов (2), без стационаризации;
- МК+ПО («порядок обхода») – трёхмерный метод с матрицей квантования, вычисляемой отдельно для каждого изображения, характеристикой обхода АС-коэффициентов (3), без стационаризации;
- МК+ПО+С («стационаризация») – трёхмерный метод с матрицей квантования, вычисляемой отдельно для каждого изображения, характеристикой обхода АС-коэффициентов (3), со стационаризацией с долей стационаризуемых блоков $\omega = 0,5$.

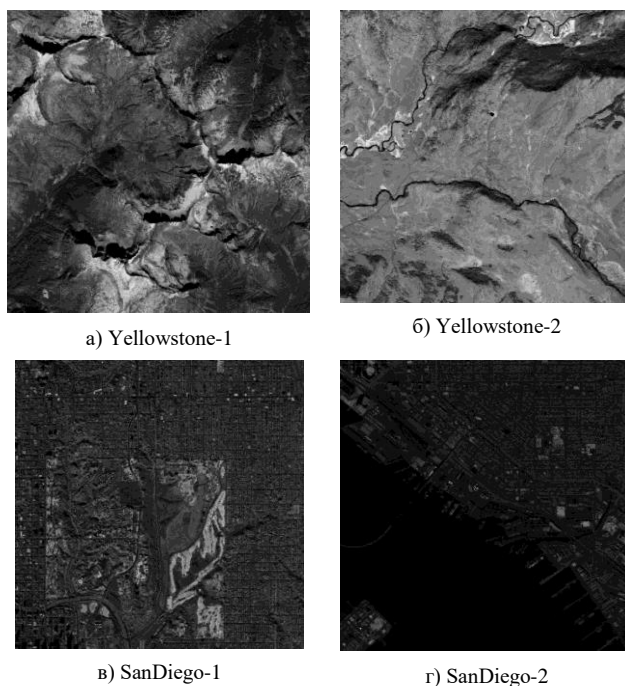


Рис. 2. Набор используемых ГСИ.

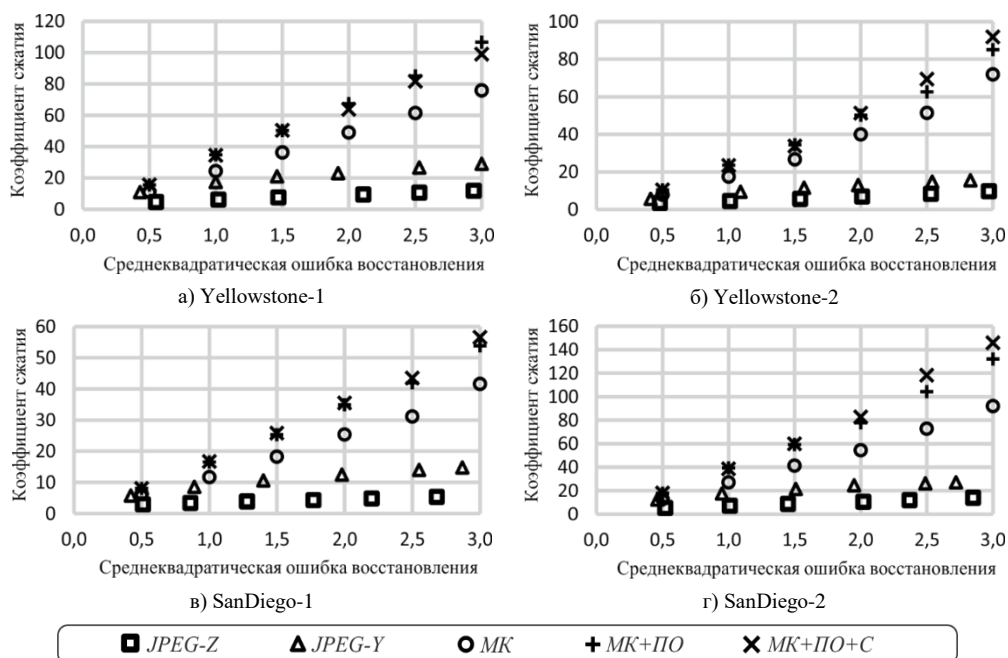


Рис. 3. Зависимость коэффициента сжатия от среднеквадратической ошибки восстановления.

5. Заключение

В работе предложен вариант метода кодирования с преобразованием для сжатия космических ГСИ, основанный на следующих модификациях:

1. Использование трёхмерных блоков с формированием отдельной для каждого изображения матрицы квантования, что приводит к более эффективному кодированию АС-коэффициентов.
2. Формирование отдельного для каждого изображения порядка обхода АС-коэффициентов, что приводит к более эффективному кодированию длин серий нулей.
3. Стационаризация входных данных, что приводит к более эффективному кодированию АС-коэффициентов.

По итогам экспериментальных исследований сделаны следующие выводы:

1. Использование трёхмерных блоков с формированием отдельной для каждого изображения матрицы квантования приводит к существенному увеличению коэффициента сжатия (в 2 и более раза) при одинаковой ошибке восстановления. Отметим, что для удобства предложенный в данной работе алгоритм вычисления матрицы квантования всегда формирует значения $Q(n)$, кратные целой степени двойки. Формирование более оптимальных матриц квантования может представлять поле для дальнейших исследований.
2. Использование отдельного для каждого изображения порядка обхода АС-коэффициентов позволяет увеличить коэффициент сжатия дополнительно примерно на 40%.
3. Стационаризация входных данных позволяет незначительно увеличить коэффициент сжатия (примерно на 5% для изображений «Yellowstone-2» и «SanDiego-1», на 10% для «SanDiego-2») при относительно большой (более 2,0) ошибке восстановления. При этом в данной работе используется достаточно примитивный алгоритм выбора блоков для стационаризации (выбирается половина блоков, стационаризация которых приведёт к наибольшему уменьшению среднеквадратической ошибки восстановления). Использование более оптимального алгоритма выбора блоков для стационаризации также может представлять поле для дальнейших исследований.

Благодарности

Разделы 3.1, 3.2 данной работы выполнены за счёт гранта РФФИ № 16-29-09494-офи-м, разделы 3.3 и 4 – за счёт госзадания Института систем обработки изображений РАН.

Литература

- [1] Yu, G. Image compression systems on board satellites / G. Yu, T. Vladimirova, M.N. Sweeting // Acta Astronautica. – 2009. – Vol. 64. P. 988-1005. – DOI: 10.1016/j.actaastro.2008.12.006.
- [2] Прэтт, У. Цифровая обработка изображений / У. Прэтт. – М.: Мир, 1982. – Кн. 2. – 480 с.
- [3] Методы компьютерной обработки изображений / М.В. Гашников, Н.И. Глумов, Н.Ю. Ильясова, В.В. Мясников, С.Б. Попов, В.В. Сергеев, В.А. Соيفер, А.Г. Храмов, А.В. Чернов, В.М. Чернов, М.А. Чичёва, В.А. Фурсов. – Под ред. В.А. Соифера. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2003. – 784 с.
- [4] ISO/IEC 10918-1. Information technology. Digital compression and coding of continuous-tone still images. Requirements and guidelines. – ISO/IEC JTC 1/SC 29 Coding of audio, picture, multimedia and hypermedia information, 1994. – 182 p.
- [5] Прэтт, У. Цифровая обработка изображений / У. Прэтт. – М.: Мир, 1982. – Кн. 1. – 312 с.
- [6] Сергеев, В.В. Параметрическая модель автокорреляционной функции космических гиперспектральных изображений / В.В. Сергеев, Р.Р. Юзькив // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 3. – С. 416-421. – DOI: 10.18287/0134-2452-2016-40-3-416-421.
- [7] Otsu, N. A threshold selection method from gray-level histogram / N. Otsu // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1979. – Vol. 9(1). – P. 62-66. – DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076.
- [8] AVIRIS Data Portal [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://aviris.jpl.nasa.gov/alt_locator/ (01.09.2016).